

一种多传感器图像并行融合新方法

程英蕾^{1,2}, 胡伏原¹, 赵荣椿¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘要:小波包变换能够为图像融合提供非常精细的分析。但是,在图像较大时融合的计算量大,耗时长,难以进行快速、实时融合。通过对小波包融合方法在单处理机上的执行效率的分析,针对算法固有的时间复杂性和并行性,提出了一种分布存储环境下的小波包并行融合算法。该算法针对小波变换计算的数据局部性特点,设计并实现了基于 Pentium PC 和 1000Mbps 交换式以太网的机群系统的 MPI(Message Passing Interface)并行环境的并行小波包图像融合方法。针对不同大小图像、以及不同的集群规模,分析了并行计算的性能。在机群系统上对算法进行实现,结果表明该算法具有良好的并行性能。

关键词:小波包变换;图像融合;MPI 框架;并行计算

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)06-0040-04

为加快图像融合处理过程,本文以高性能并行机群(Cluster)为并行环境,配备并行支撑软件-MPI 程序开发库为软件基础,采用消息传递并行编程模式,提出一种基于小波包变换的多传感器图像并行融合算法。

1 小波包变换串行融合算法及其分析

1.1 小波包变换串行融合算法

小波包分析能够为信号提供一种非常精细的分析方法。它不仅分解信号的低频,而且,也能对高频进行分解。如图 1 所示,以文献[1]中算法对多光谱 TM 图像和 SAR 高分辨率图像融合的具体步骤如下:①对 TM 多光谱图像进行从 RGB 空间到 IHS 空间的转换,得到 I (亮度)、 H (色调)、 S (饱和度)3 个分量;②分别对 SAR 图像和第①步得到的 I 分量进行 1 次小波变换,得到各自相应分辨率的低频信息和高频细节信息,本文中选用 Daubechies 的 $D3$ 作为小波基;③对第②步所得到的所有低频和高频信息同时进行 2 级小波分解;④按照线性加权融合准则分别将两幅图像的对应部分加权求和进行融合;⑤将融合后的内容进行逆变换;⑥重复第④、⑤步两次,得到融合后的 I 分量图像;⑦对 I 分量图像和第①步中得到的 H 、 S 分量图像进行 IHS 逆变换,最终得到融合图像。

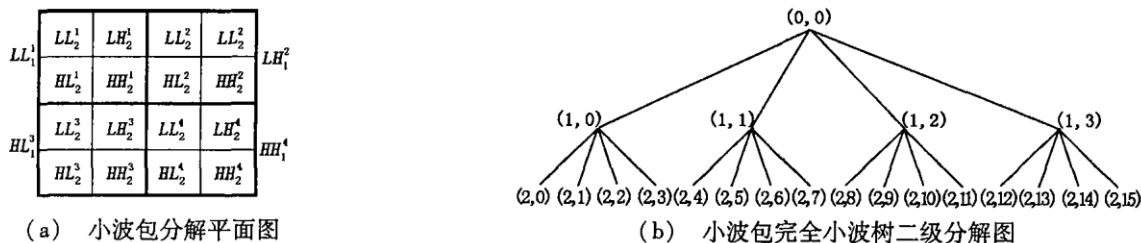


图 1 小波包分解示意图

收稿日期:2006-04-28

基金项目:“十五”国防预研项目(413160103)

作者简介:程英蕾(1964-),女,河南南阳人,博士生,副教授,主要从事图像处理与模式识别研究。

1.2 运算量估计

上述各步骤中,第①步是对 TM 整幅图像一次性处理,作为后续处理的准备,其计算复杂度较小,而且在处理中只能与后续步骤串行执行;第⑦步的后处理与预处理类似,都不必并行化。而第②、③、④、⑤、⑥步是小波包变换部分,从融合算法本身看,一次小波分解是将图像分解为低频(LL)、高频(HH)、水平方向低频垂直方向高频(LH)、水平方向高频垂直方向低频(HL)4部分,二次分解又分别将每一部分再分解4部分,二级分解后生成16部分……,需要对两幅图像对应的每个象素进行操作。其计算复杂度高,运算量大,耗时多。随着图像增大、分解级数增加而呈非线性增加。如果融合图像为大小为 $M \times N$,小波包分解级数为 L ,则小波包变换融合算法的计算复杂度 $O(M \times N \times L)$ 。当 M 、 N 、 L 很大时,时间开销非常大。因此,对其进行快速处理是加快整个融合过程的关键。

2 并行融合算法

2.1 并行小波包融合算法原理

设计并行算法的第一步是问题的分解。分解方法可分为功能分解(控制并行)和参数域分解(数据并行)两种。分析小波包串行融合算法过程可知:每一级小波系数的处理结果要作为下一级的输入,因此各级的处理过程之间以及每一级内部的处理步骤之间是强相关的,无法设计有效的控制并行。同时可知,在每一级处理过程中,各个相关系数的计算相互独立,且图像中各个像素参与的计算与顺序无关,因此本文提出数据并行分解方案。基本思想是将 $M \times N$ 图像等分为 P (机器台数)块,每块包含 $M \times N/P$ 个像素,即每台机器需要计算 $M \times N/P$ 个数据。可以看出各台机器的负载是均衡的。每一级融合处理过程中,每台机器只能得到 $M \times N/P$ 个相关系数的中间结果。各台机器将各自的 $M \times N/P$ 个中间结果发送给事先定好的管理结点(主处理机),管理结点完成最后的计算。考虑到每台机器的存储器容量的都很大,可将待融合的图像同时存放到处台机器上,以减少开始计算时发送图像所需的通信所占时间,从而进一步提高并行效率。这种算法的计算的复杂度为 $O(M \times L)$ 。

2.2 小波包变换的并行算法

小波包变换是小波变换的推广,对于图像大小为 $M \times N$ 的各像素输入数据 x_{k_1, k_2} ,小波变换将它分解为4个序列:

$$\begin{aligned} C_{m_1, m_2} &= \sum_{k_1, k_2} h_{k_1-2m_1, k_2-2m_2} x_{k_1, k_2}, & D_{m_1, m_2}^1 &= \sum_{k_1, k_2} g_{k_1-2m_1, k_2-2m_2}^1 x_{k_1, k_2} \\ D_{m_1, m_2}^2 &= \sum_{k_1, k_2} g_{k_1-2m_1, k_2-2m_2}^2 x_{k_1, k_2}, & D_{m_1, m_2}^3 &= \sum_{k_1, k_2} g_{k_1-2m_1, k_2-2m_2}^3 x_{k_1, k_2} \end{aligned}$$

其中, h 、 g^i 分别表示尺度系数和小波系数,这是第一级分解。下一步是对这4个序列的每一个都进行这样的第二级分解,得到16个序列;然后对这16个序列的每一个进行分解,……。若进行 I 步, $I \leq \log N \cdot \log M$ 。设处理机台数为 P 。对输入数据 x_{k_1, k_2} ($k_1 = 0, 1, \dots, N-1; k_2 = 0, 1, \dots, M-1$),把高度为 M/P ,大小为 $M \times N/P$ 的图像块分配给 P 台处理机。一般而言,输入图像很大,而 h 、 g^i 的非零项很少(集中在下标为零的附近),因此,计算输出序列在点 (m_1, m_2) 处的值只需要输入序列在点 $(2m_1, 2m_2)$ 附近点的值,这说明计算基本上只依赖局部数据。若将数据适当地分成大小相等的若干块,让每台处理机负责其中一块的分解计算,则在处理内部点分解时,需要处理机之间的数据交换。若分块时让数据在边界上有一定的重叠(根据 h 、 g^i 的非零点的数目确定要重叠的数据的多少),则可以减少处理机之间需要交换的数据量。每进行一步分解后需要对处理机之间的数据进行适当的重新分配,这也要进行数据交换。而在分解过程进行了一定的步数以后,以下的分解是对多个不同的序列进行完全独立的分解。当序列个数已经达到或超过处理机台数时,只要让每台处理机负责其中一个或多个序列的分解,则处理机之间不再需要进行数据交换。从而减少机器之间的数据通信所占时间,提高并行效率。

2.3 并行融合算法实现步骤

本文算法运行的硬件环境是8台由千兆以太网互连的高性能PC机;每台机器上都安装了MPICH软件,以支持基于MPI的并程序的消息传递,采用VC++编程语言。算法中各步骤的具体描述如下:①预处理:对多光谱图像进行从RGB空间到IHS空间的转换,得到代表的 I (亮度)、 H (色调)、 S (饱和度)的3个

分量。这步与串行算法中的处理方式相同,由管理结点完成;将求得的两图的输出图像范围及 I 分量发送到各计算结点;②数据划分:根据结点的数目 P ,对输入图像 I 分量和高空间分辨率图像(待融合图像)进行规则划分,每个结点保存一块输入子图像;③局部输出区域计算:计算本地保存的输入子图像对应应在目标图像中的范围,确定本结点需完成的两幅子图像的小波包分解计算;④局部融合计算:对范围内的每个输出像元,利用线性加权融合原则计算每一点的 I 值;⑤后处理:数据收集与规整。各结点将本地的局部计算结果数据传给管理结点,管理结点按照对 I 分量图像和第①步中得到的 H 、 S 分量图像进行 IHS 逆变换,最终得到融合图像。

3 并行算法性能分析

并行算法常用的评价指标是加速比和并行效率,它反映了并行机上运用并行算法求解实际问题所能获得的性能。具体讲,并行系统的加速比指的是对于一个给定的应用,并行算法的执行速度相对于串行算法的执行速度加快了多少倍。其加速比 $S(n)$ 和并行效率 E 定义如:

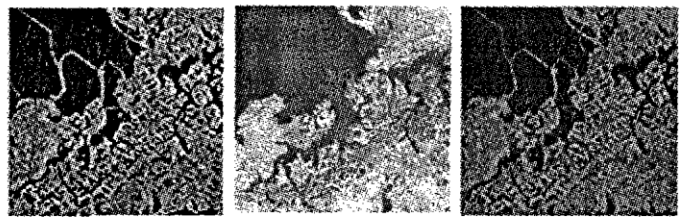
$$S(n) = t_s / t_p \quad (1) ; \quad E = S(n) / n = t_s / nt_p \quad (2)$$

式中 t_s 为单处理机执行的时间, t_p 为多处理机并行执行时间; n 为微处理器个数。

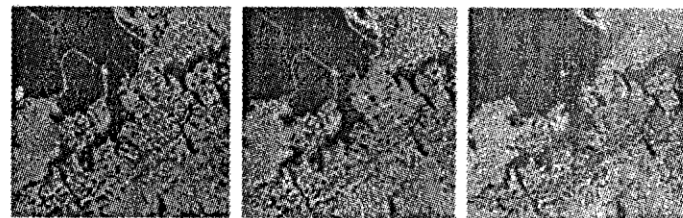
为了评估本文所提小波包变换并行融合算法的性能和效率,我们用 SAR 和 TM 多光谱遥感图像进行了融合试验。结果表明,本文算法不但能有效融合 SAR 图像和 TM 多光谱图像,得到融合图像优于源图像的结果,而且具有较高的并行加速比和并行效率。图 2 给出了并行融合算法的不同加权结果对比,表 1 给出了串并行算法的运行时间以及并行算法的加速比和并行效率。

表 1 并行融合算法效率

图像大小	处理机/台	时间/s	加速比	效率
512 × 512	1	3.237 1		
	2	1.814 9	1.779 6	89.18%
	4	1.388 9	2.330 7	58.27%
	8	0.705 8	4.586 4	57.33%
1 024 × 1 024	1	10.783 2		
	2	5.924 7	1.820 0	91.00%
	4	3.170 5	3.105 4	85.03%
	8	1.690 2	6.379 8	79.75%



(a) SAR 源图像 (b) TM 源图像 (c) $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.9$



(d) $\alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.7$ (e) $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.5$ (f) $\alpha_1 = 0.8, \alpha_2 = 0.2$

图 2 源图像和不同融合系数融合结果图像

3.1 线性加权取值比较

本文采用加权融合规则对 TM 多光谱图像和 SAR 高空间分辨率图像进行融合。加权计算公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (4)$$

式中 α_i 为加权系数; I_i 为不同传感器图像; I 为融合后的图像。本实验中 $n=2$ 。 α_1 是多光谱图像的加权系数, α_2 是 SAR 图像加权系数。 α_1, α_2 取不同值的融合结果如图 2 所示。由融合结果知: SAR 图像的加权系数大,则融合图像的空间分辨率相对较高、光谱信息较少;反之,则融合图像的空间分辨率相对较低、光谱信息较多。一般情况下,加权系数的大小根据经验加以确定。对于小波包融合方法,由于可以将图像进行任意分解,可根据融合后图像的用途和具体要求,不同子图可随意选择加权系数,灵活性高。

本文之所以采用加权融合规则,没有采用基于区域能量的融合规则,原因在于前者在并行计算时,不需要进行额外数据通信,有利于提高并行效率;而后者在并行计算过程中,边界区域的计算需要各机之间数据通信,而且图像越大,需要的通信量越大,并行效率则会降低。

3.2 并行效率分析

本文提出的并行算法可以有效的融合 SAR 图像和 TM 多光谱图像。从表 1 可见,虽然本并行算法中保

留了两个串行环节,但是由于它们的复杂度与已经实现了并行的小波包变换的计算复杂度相比微不足道,所以整个并行算法仍然具有较高的效率。因为本算法采用加权融合规则,在多机计算时,不需要进行额外数据通信,因此图像越大,并行效率越高、加速比越大。

当图像大小为 512×512 时,2机并行的环境下加速比是 89.18%,8机效率达到 57.33%;图像大小为 1024×1024 时,2机并行的环境下加速比是 91.00%,8机效率达到了 79.75%。这与理论分析结果一致。

4 结论

本文首先给出了多传感器图像的小波包变换融合方法,分析了其潜在的并行性,在此基础上,确定了 MPI 并行实现的运行环境,并且给出并行实现方法。通过在不同机群数量上的运行,结果表明,本文给出的并行实现具有加速比基本呈线性,效率基本不变的特点。并行性能理想。

小波包变换图像融合方法是一种性能优良的融合方法,目前正受到国内外同行的广泛关注,本文从并行实现角度研究它的快速、时实实现,对小波包变换图像融合并行方法的推广和应用提供有益的指导和借鉴。

参考文献:

- [1] 程英蕾,赵荣椿.一种基于小波包变换的 SAR 图像与 TM 图像融合方法[J].西北工业大学学报,2004,(5):89-92.
- [2] Cao Wen, Li Bi Cheng, Zhang Yong. A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform[A]. IEEE Int Conf Neural Networks & Signal Processing [C]. Nanjing China:, 2003, 14-17.
- [3] Jiang X, Zhou L, Gao Z. Multi-Spectral Image Fusion Using Wavelet Transform [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 98:35-42.

(编辑:门向生)

A New Parallel Multi-sensor Image Fusion Method

CHENG Ying-lei^{1,2}, HU Fu-yuan¹, ZHAO Rong-chun¹

(1. Department of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 2. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: To enhance the information from different sensors and improve the analytic and extracting ability of images, an algorithm of image fusion based on the wavelet packet transform is proposed after studying the wavelet packet analysis method. Although the analyzing method based on the wavelet packet is more accurate than that based on the multi-resolution wavelet, with the former method, computing complexity is exponentially increased with the growth of image size. After analyzing the efficiency of image fusion algorithm based on the wavelet packet on the single computer, the inherent complexity and the parallelism of the above fusion algorithm, a parallel image fusion based on wavelet packet in the MPI (message passing interface) framework is proposed. In addition, the efficiency of parallel computing is studied under different conditions as different image size and different cluster size. The experimental result shows that the efficiency of parallel computing is obviously improved and this paves the way for the future design of highly efficient and real-time fusion algorithms.

Key words: wavelet packet transform (WPT); image fusion; MPI framework; parallel computing